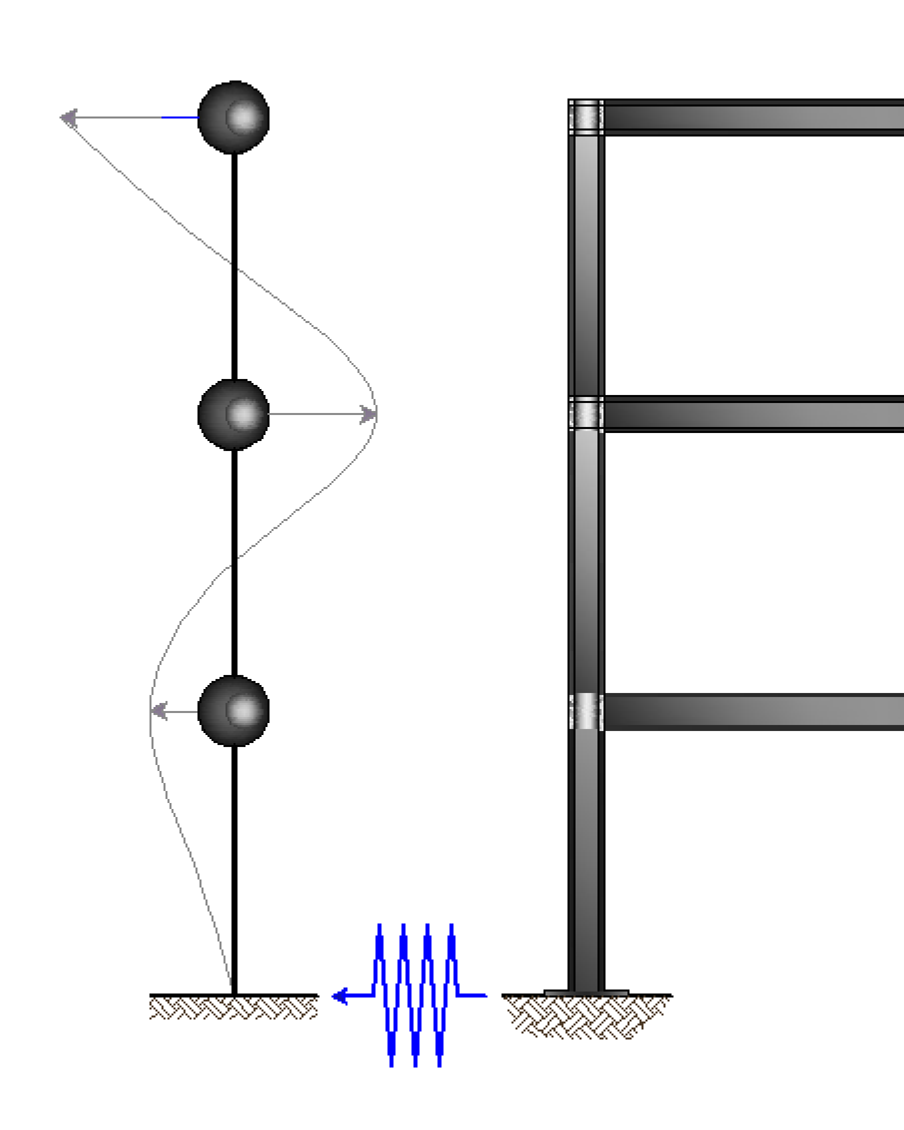




MANUAL DEL USUARIO

MANUAL DEL USUARIO

1. INTRODUCCIÓN AL PME

1.1 ¿Qué es el programa modular de estructuras?

El Programa Modular de Estructuras (PME) es un programa para análisis estático y dinámico lineal de estructuras en dos dimensiones desarrollado en MATLAB, que utiliza el método de rigidez directa en conjunto con el método de los elementos finitos para el análisis estático, el método de los elementos finitos y el método de masas concentradas para el análisis dinámico modal y los espectros de respuesta de la Norma COVENIN 1756:2001 para el análisis modal espectral. Este programa fue creado en el año 2011 en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado UCLA para fines académicos, por Carlos Abella y Gino Pannillo bajo la supervisión del Dr. Juan C. Vielma como un trabajo especial de grado.

Esta primera versión del programa PME, permite la creación y modificación de estructuras en dos dimensiones, con entradas de datos y visualización de resultados por medio de una amplia serie de ventanas graficas, que además permiten exportar resultados y variables involucradas durante el análisis de la estructura a formato *.xls*.

1.2 Módulos y Aplicaciones

El Programa Modular de Estructuras se divide en cuatro módulos conectados por un módulo principal. El módulo principal permite seleccionar el tipo de estructura a analizar. El primer módulo (*Armadura 2D*) permite realizar análisis estático y dinámico lineal de armaduras, en el cual se consideran dos grados de libertad por

nodo, donde las cargas aplicadas al modelos solo actúan sobre los nodos. El segundo módulo (*Viga continua*) permite realizar análisis estático y dinámico lineal de vigas, en éste se consideran dos grados de libertad por nodo y las cargas asignadas actúan tanto en los nodos como sobre los tramos. El tercer módulo (*Pórtico 2D*) permite realizar análisis estático y dinámico lineal de pórticos. En éste se consideran tres grados de libertad por nodo y las cargas asignadas actúan tanto en los nodos como sobre los tramos. Las masas a considerar en el análisis dinámico de los tres primeros módulos provienen de cada elemento que forma la estructura. El cuarto modulo (*Edificio de corte 2D*) permite realizar análisis dinámico considerando un grado de libertad por nivel, donde las masas de cada nivel son asignadas por medio de una interfaz gráfica. En los cuatro módulos el análisis espectral es realizado utilizando los espectros propuestos en la Norma Venezolana COVENIN 1756:2001 los cuales quedan definidos según los parámetros señalados en la misma.

2 INSTALACION DEL PME

La carpeta PMEv1.0 consta de dos archivos, el primero un archivo *.txt* el cual contiene los pasos a seguir para la instalación del programa y el segundo un archivo *.pkg.* Copiar y pegar el archivo *.pkg* y haciendo doble click sobre archivo se inician los procedimientos de instalación de archivos. Seguidamente aparecerá en el escritorio un icono que llevará de manera directa al Programa Modular de Estructuras. El proceso de instalación puede durar algunos minutos. La versión PME v1.0 se encuentra disponible para computadoras que no poseen MATLAB. En el caso de presentarse algún inconveniente durante el proceso de instalación, en el archivo *.txt* se indican los pasos a seguir para solucionar algunos de los posibles inconvenientes.

3. COMPONENTES DE LAS VENTANAS GRAFICAS. ENTORNO

3.1 Interfaz grafica principal

En el PME se encuentran disponibles cuatro módulos de análisis, los cuales son accedidos por medios de botones desde la interfaz grafica principal (Figura 3.1).



Figura 3.1 Inicio del PME. Selección del módulo para el análisis

3.2 Modulo Pórtico 2D

En general, todos los módulos poseen barras de menú que permiten la construcción del modelo; sin embargo, se describe solamente el módulo *Pórtico 2D* por ser considerado el módulo más complejo.

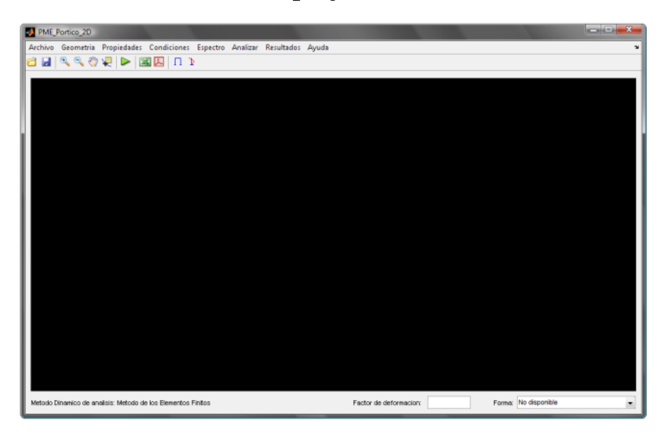


Figura 3.2 Ventana principal del módulo Pórtico 2D

3.2.1 Menú Archivo

El menú *Archivo* contiene comandos para abrir y guardar proyectos.

Archivo
Abrir...
Guardar
Guardar como...
Salir

Abrir: Abre un proyecto existente.
Guardar: Guarda el proyecto actual.
Guardar como: Guarda el proyecto con diferente nombre.
Salir: Cierra el PME.

3.2.2 Menú Archivo

El menú *Geometría* contiene comandos que muestran ventanas para crear, modificar y eliminar nodos y elementos del modelo.

Geometria
Definir nodos
Modificar nodos
Eliminar nodos
Definir elementos
Modificar elementos
Eliminar elementos

Definir nodos: Muestra la ventana donde se crean los nodos.
Modificar nodos: Muestra la ventana donde se modifican las coordenadas de los nodos.
Eliminar nodos: Muestra la ventana donde se eliminan los nodos del modelo.
Definir elementos: Muestra la ventana donde se crean los elementos.
Modificar elementos: Muestra la ventana donde se modifican las coordenadas de los elementos.
Eliminar elementos: Muestra la ventana donde se eliminan los elementos del modelo.

3.2.3 Menú Propiedades

Propiedades Asignar Seccion/Material	*Asignar Sección/Material:* Muestra la ventana donde se asignan las propiedades geométricas y mecánicas de los elementos.

3.2.4 Menú Condiciones

En el menú *Condiciones* se establecen las condiciones de fuerzas y desplazamientos del modelo.

Condiciones Restricciones Fuerzas nodales Fuerzas distribuidas Desplazamientos impuestos	*Restricciones:* Muestra la ventana donde se asignan las restricciones a los nodos.
	Fuerzas nodales: Muestra la ventana donde se asignan fuerzas a los nodos.
	Fuerzas distribuidas: Muestra la ventana donde se asignan fuerzas sobre los elementos.
	Desplazamientos impuestos: Muestra la ventana donde se imponen desplazamientos a los nodos.

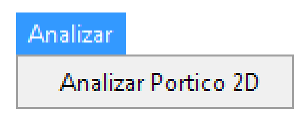
3.2.4 Menú Espectro

En el menú *Espectro* se establecen las condiciones de fuerzas y desplazamientos del modelo.

Espectro Espectro de respuesta Metodo de combinacion Modal COVENIN 1756:2001 (Articulado) COVENIN 1756:2001 (Comentarios)	*Espectro de respuesta:* Muestra la ventana donde se modifican los parámetros para la construcción del espectro.
	Método de combinación Modal: Se selecciona el tipo de combinación modal.

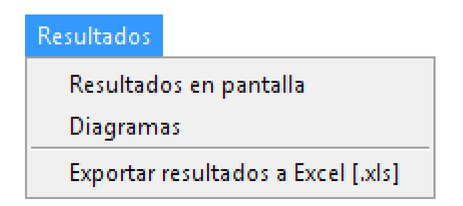
Los comandos *COVENIN 1756:2001 (Articulado)* y *COVENIN 1756:2001 (Comentarios)* muestran la Norma Venezolana en formato PDF.

3.2.4 Menú Analizar



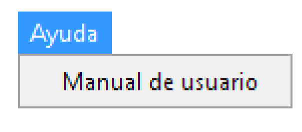
Analizar Pórtico 2D: Realiza el análisis del Pórtico. También se logra presionando

3.2.4 Menú Resultados



Resultados en pantalla: Muestra en una ventana los resultados del análisis.
Diagramas: Muestra en una ventana interactiva los valores de Momento, corte y deformada de cada elemento.
Exportar resultados a Excel [.xls]: Exporta los datos y resultados obtenidos en el análisis de la estructura.

3.2.4 Menú Analizar



Manual del usuario: Muestra el documento donde se indica la descripción general del PME, las bases teóricas además de ejemplos que permiten iniciar al usuario en el PME.

4. PRESENTACION DE RESULTADOS

4.1 Resultados en pantalla

La forma deformada de la estructura para el análisis estático, los diferentes modos de vibración de la estructura para el análisis dinámico modal y la forma deformada bajo análisis modal espectral, pueden ser vistos en pantalla seleccionando en el *popupmenu* la forma deseada. Los resultados mostrados en la ventana dependerán del Método de análisis dinámico seleccionado (Método de los elementos finitos o Método de masas concentradas). Ver Figura 4.1.

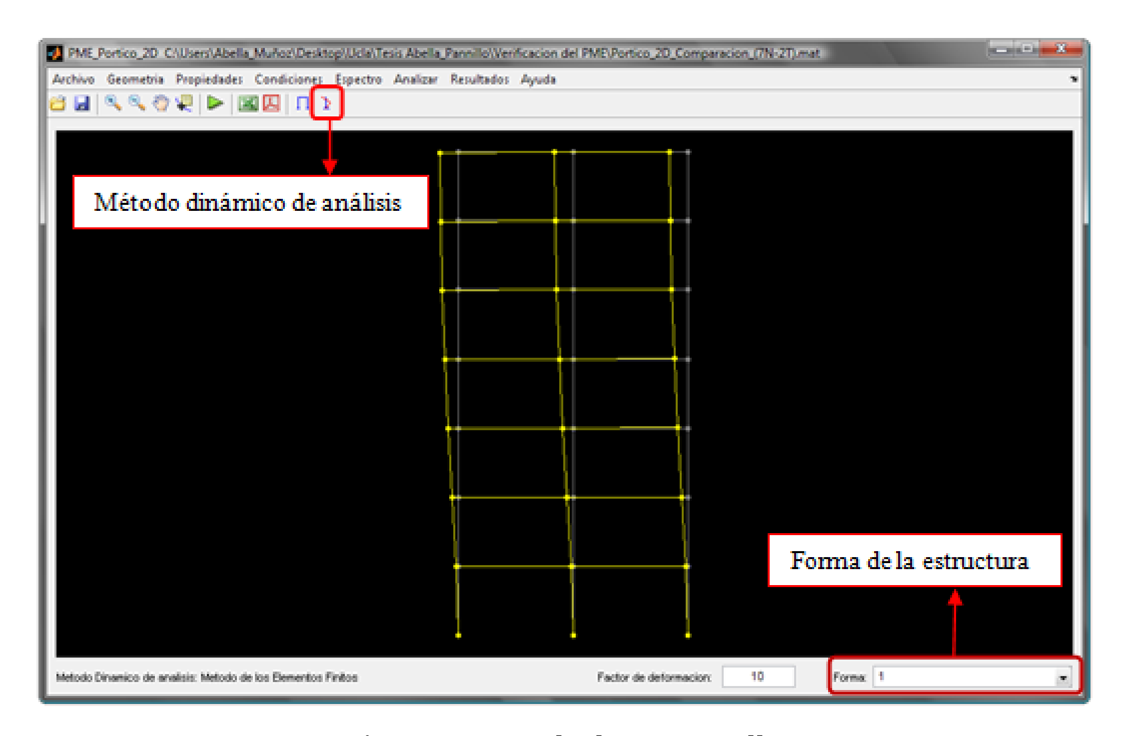


Figura 4.1 Resultados en pantalla

4.2 Resultados en ventana gráfica

Los resultados obtenidos durante el análisis pueden ser vistos por medio de una ventana gráfica llamada $Resultados \rightarrow Resultados\ en\ pantalla$, con éllos se despliega una ventana como la mostrada en la Figura 4.2. En élla se muestran los datos del modelo, resultados del análisis estático, resultados del análisis dinámico modal y resultados del análisis dinámico modal-espectral. La selección del tipo de análisis dinámico se encuentra solamente disponible en los módulos *Armadura 2D* y *Pórtico 2D*.

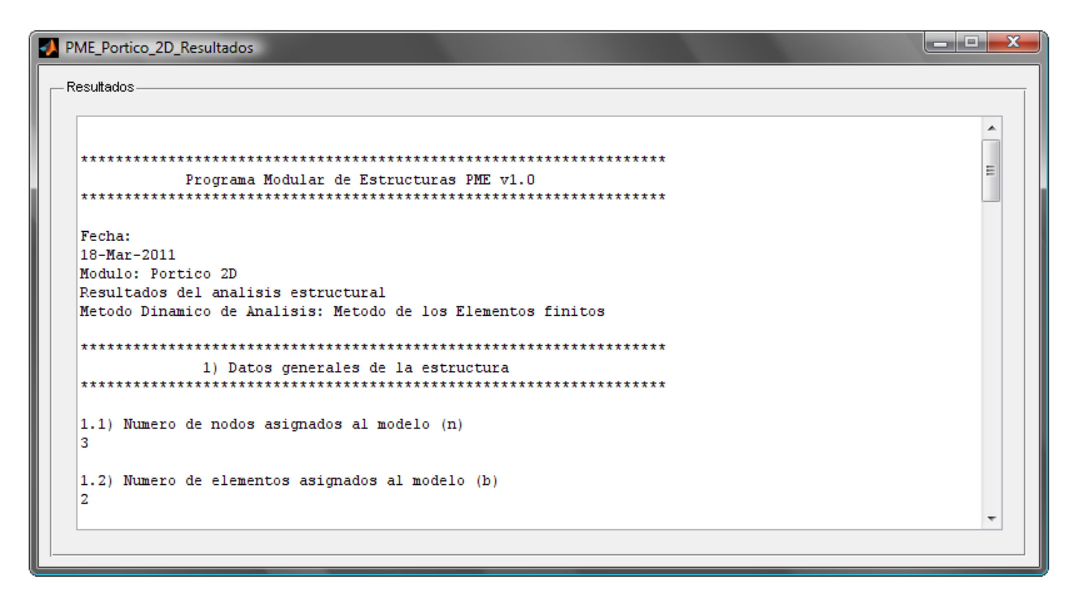


Figura 4.2 Ventana grafica de resultados

4.3 Exportando a Excel

En el Programa Modular de Estructuras también es posible exportar todos los resultados mostrados en la ventana de resultados además de la matriz de rigidez de la estructura K y la matriz de masas M, seleccionando el menú $Resultados \rightarrow Exportar\ resultados\ a\ Excel$ o simplemente presionando el botón tal y como

se muestra en la figura 4.3.

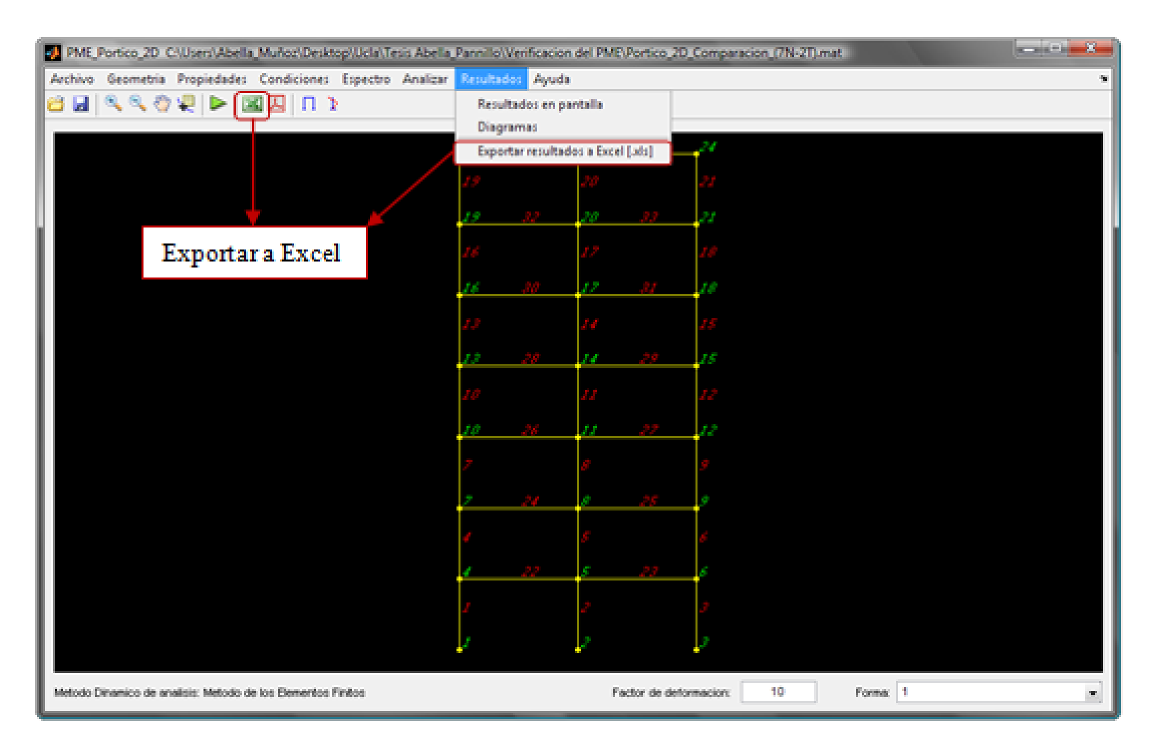


Figura 4.3 Ventana grafica de resultados

Los Archivos en formato *.xls* están organizados por hojas de trabajo. Cada hoja de trabajo posee una variable. La identificación de dicha variable se encuentra en la pestaña inferior además de las unidades en la que se encuentra.

5. TUTORIAL

Los ejemplos presentados en este manual tienen la intención de mostrar al usuario como utilizar el PME además de mostrar los resultados obtenidos para cuatro diferentes estructuras que fueron comparadas con programas de uso comercial o con ejemplos resueltos. Cada ejemplo muestra la forma de introducción de datos al programa, como realizar el análisis además de la forma de visualizar los resultados. Al final de cada ejemplo se muestra una tabla que contiene los valores obtenidos en el PME y la diferencia obtenida al comparar los resultados.

En el PME se encuentran disponibles cuatro módulos de análisis, a los cuales se accede por medios de botones desde la interfaz gráfica principal. Ver Figura 5.1.



Figura 5.1 Inicio del PME. Selección del módulo para el análisis.

La metodología escogida es de tipo dinámica que permitirá mostrar las diferentes interfaces del programa en cada uno de los módulos. A continuación se desarrollan diferentes ejemplos para la verificación del programa y sus diferentes módulos.

EJEMPLO 1

Armadura 2D-Desplazamientos impuestos

Descripción general

Utilizando una estructura tipo armadura, se pretende con este ejemplo verificar el Programa Modular de Estructuras para desplazamientos impuestos en dirección del eje global de la estructura. Para la verificación se determinará la fuerza en cada elemento, bajo la condición que el apoyo 1 se desplaza verticalmente hacia abajo 25 mm, Figura 5.2. Considerar $AE = 8 \times 10^3\ kN$.

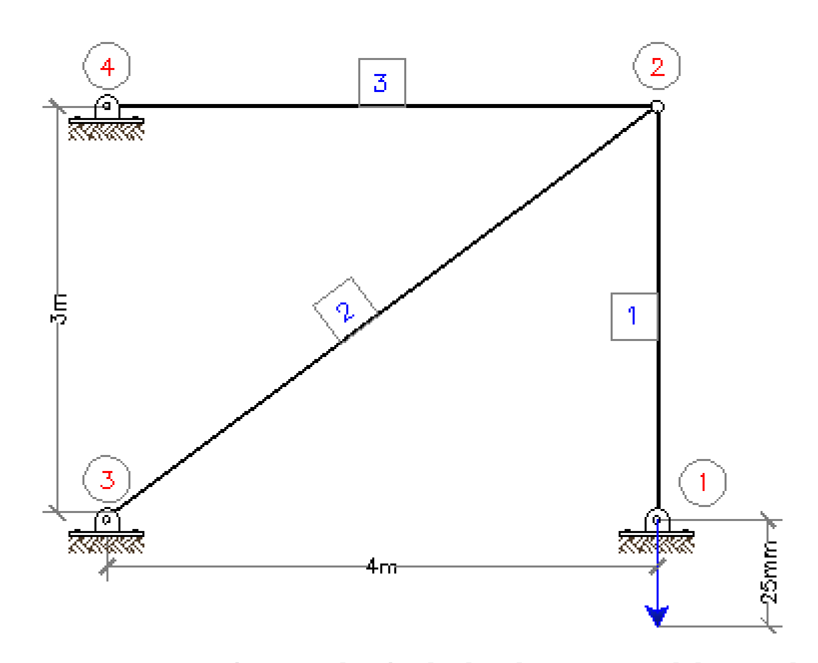


Figura 5.2 Geometría y condición de desplazamiento del ejemplo 1.

Características del programa evaluadas

- Solución para desplazamientos impuestos en dirección de los ejes globales sobre apoyos y nodos libres.

Solución con PME

Tomando en cuenta que $AE = 8 \times 10^3\,kN = 815494.39\,kgf$, para el análisis se consideró un valor de área $A = 1\,m^2$ y un módulo de elasticidad $E = 815494.39\,kgf/m^2$.

Geometría: Para asignar las coordenadas de cada nodo, se selecciona $Geometria \rightarrow Definir\,nodos$, luego se introducen la coordenada X y Y de cada nodo y se presiona el botón $Definir$. Para asignar los elementos, se elige $Geometria \rightarrow Definir\,elementos$, luego se asigna el nodo inicial y el nodo final definiendo la conectividad del elemento y se presiona el botón $Definir$, ver Figura 5.3.

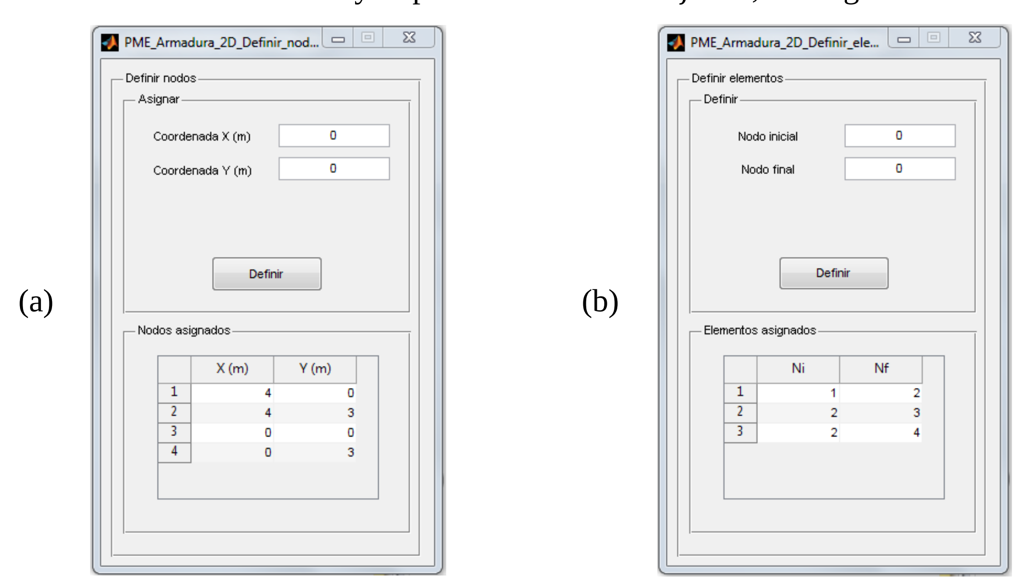


Figura 5.3 Ventanas graficas del ejemplo 1. (a) Definir nodos y (b) Definir elementos.

En la Figura 5.3 se observan las coordenadas asignadas a cada nodo y la conectividad de los elementos en sus respectivas ventanas graficas.

Una vez introducidos los datos geométricos, se puede visualizar la disposición de los nodos y elementos con sus respectivas etiquetas presionando el botón *Mostrar estructura*, tal y como se muestra en la Figura 5.4.

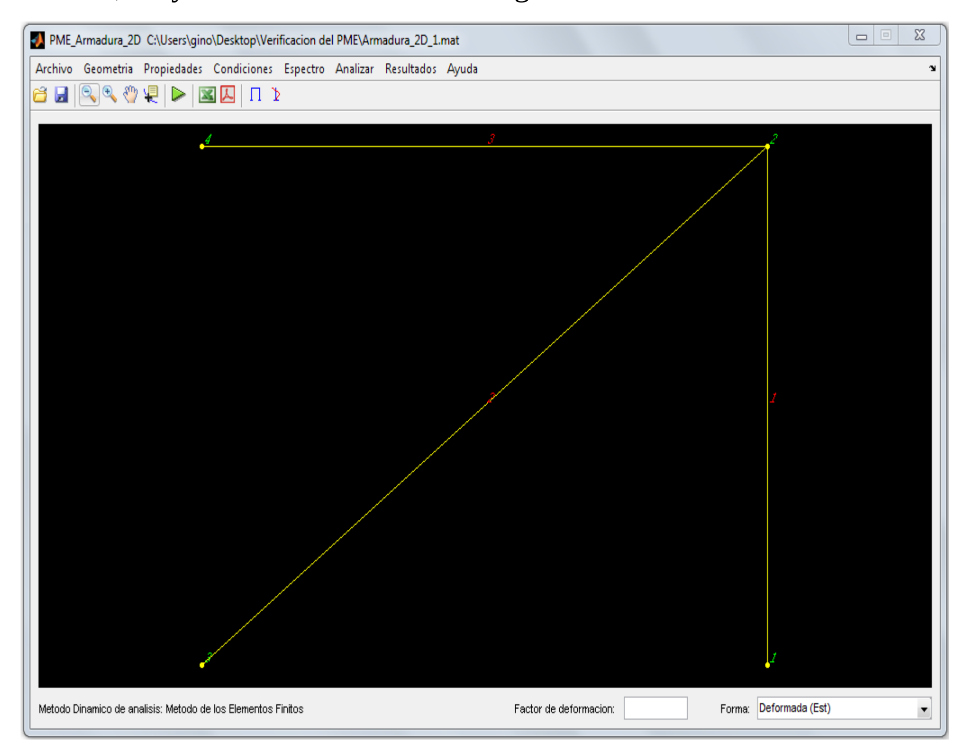


Figura 5.4 Visualización del modelo ejemplo 1.

Propiedades: Para introducir las propiedades del material y de la sección se selecciona la opción $Propiedades \rightarrow Asignar\ Seccion/Material$, con ello se despliega en pantalla una ventana igual a la de la Figura 5.5. En el recuadro de propiedades se introduce el área y el módulo de elasticidad del elemento, se presiona el botón $Asignar$.

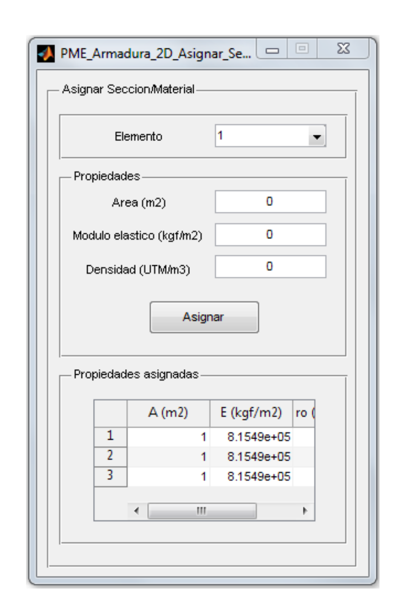


Figura 5.5 Ventana grafica del ejemplo 1. Asignar Sección/Material.

Condiciones: Los apoyos se asignan al modelo seleccionando el nodo al cual se le asignara la restricción y eligiendo el *check* según la dirección de la restricción, luego se presiona el botón $Asignar$. Para asignar desplazamientos a un nodo, primeramente se debe restringir el nodo en la dirección del desplazamiento, una vez restringido y seleccionado el nodo, se coloca la cantidad del desplazamiento según la dirección de los ejes coordenados X y Y. Posteriormente se oprime el botón $Asignar$, la Figura 5.6 muestra las restricciones y desplazamientos asignados a cada nodo en sus respectivas ventanas graficas.

Análisis: Una vez introducido todos los datos de entrada, se selecciona la opción $Analizar \rightarrow Analizar\ Armadura\ 2D$, o presionando el botón, con ello se realizan todas las operaciones de cálculo.

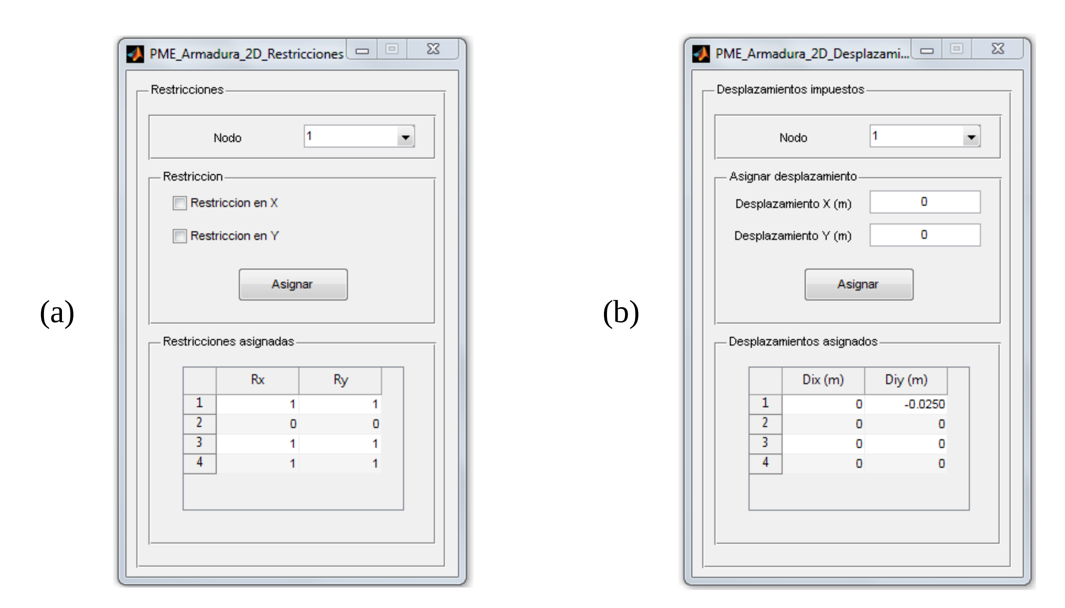


Figura 5.6 Ventanas graficas del ejemplo 1. (a) Restricciones y (b) Desplazamientos impuestos.

Resultados: Los resultados referentes a cada elemento se muestran seleccionando la opción $Resultados \rightarrow Resultados\ en\ pantalla$, a través de este sub-comando se despliega en pantalla los resultados, en ella se muestran tanto los datos de entrada como los resultados obtenidos. En la Figura 5.7 se muestra la pantalla de resultados, en ella se observa los valores de fuerza axial para cada elemento. Para el elemento 2 se tiene una fuerza axial $F_2 = -1415.7889\ kgf$.

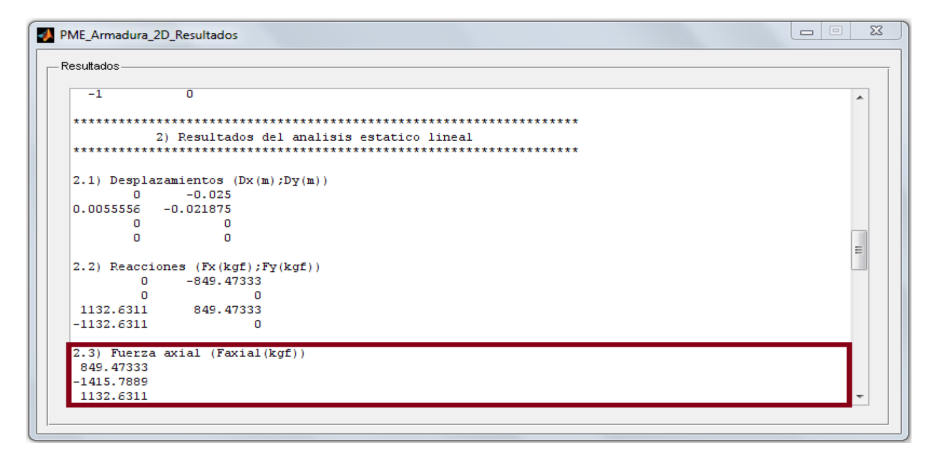


Figura 5.7 Resultados en pantalla del ejemplo 1.

Validación de los resultados

Los resultados obtenidos con el PME han sido comparados con los obtenidos en el texto Hibbeler R.C. Análisis Estructural (1997), Ejemplo 14-5 pág. 679. La diferencia en porcentaje se calcula de la siguiente forma:

$$Diferencia\% = 100\% \times \left(\frac{PME\ resultados}{Otros\ resultados} - 1\right)$$

Tabla 5.1 Comparación de resultados para el ejemplo 1.

Parámetro	PME	Hibbeler (1997)	Diferencia %
F_1	$849.47333\ kgf = 8.33\ kN$	$8.34\ kN$	0.12 %
F_2	$-1415.7889\ kgf = -13.89\ kN$	$-13.9\ kN$	0.07 %
F_3	$1132.6311\ kgf = 11.11\ kN$	$11.1\ kN$	0.09 %

Los valores obtenidos en el PME difieren en menos del 0.13%, por lo tanto los resultados son aceptables.

EJEMPLO 2

Armadura 2D-Periodos de vibración.

Descripción general

Utilizando una estructura tipo armadura, se pretende con este ejemplo verificar el Programa Modular de Estructuras para el cálculo de los periodos de vibración. Para la verificación se determinarán los diferentes periodos de vibración de la armadura que se muestra en la Figura 5.8. Considerar todos los elementos con una sección transversal tipo $W18 \times 35$.

$A = 0.006645\ m^2$

$$E = 20390000000 \frac{kgf}{m^2}$$

$$\rho = 800.3801 \frac{UTM}{m^3}$$

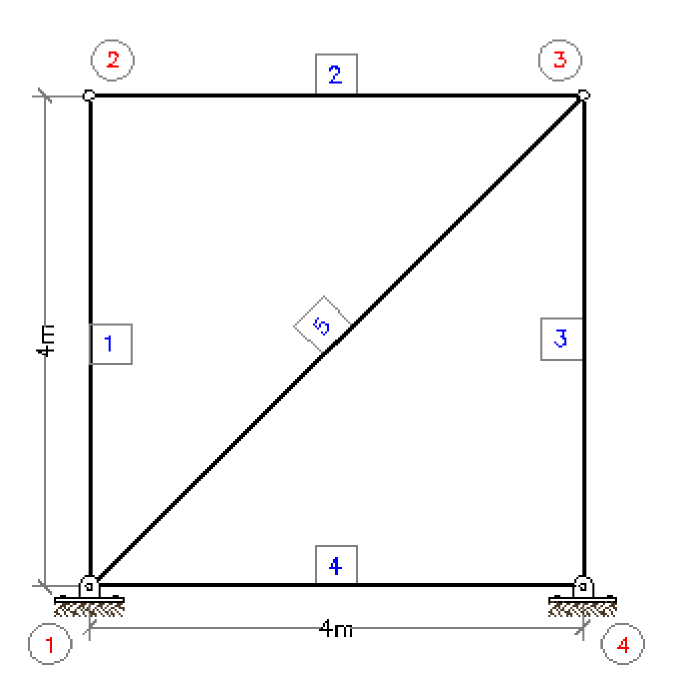


Figura 5.8 Geometría del ejemplo 2.

Características del programa evaluadas

- Solución del problema de autovalores y autovectores.

Solución con PME

Geometría: Para asignar las coordenadas de cada nodo, se selecciona $Geometria \rightarrow Definir\ nodos$, luego se introducen la coordenada X y Y de cada nodo y se presiona el botón $Definir$. Para asignar los elementos, se elige la opción $Geometria \rightarrow Definir\ elementos$, después se asigna el nodo inicial y el nodo final definiendo la

conectividad del elemento y se presiona el botón $Definir$. La Figura 5.9 muestra coordenadas asignadas a cada nodo y la conectividad de los elementos.

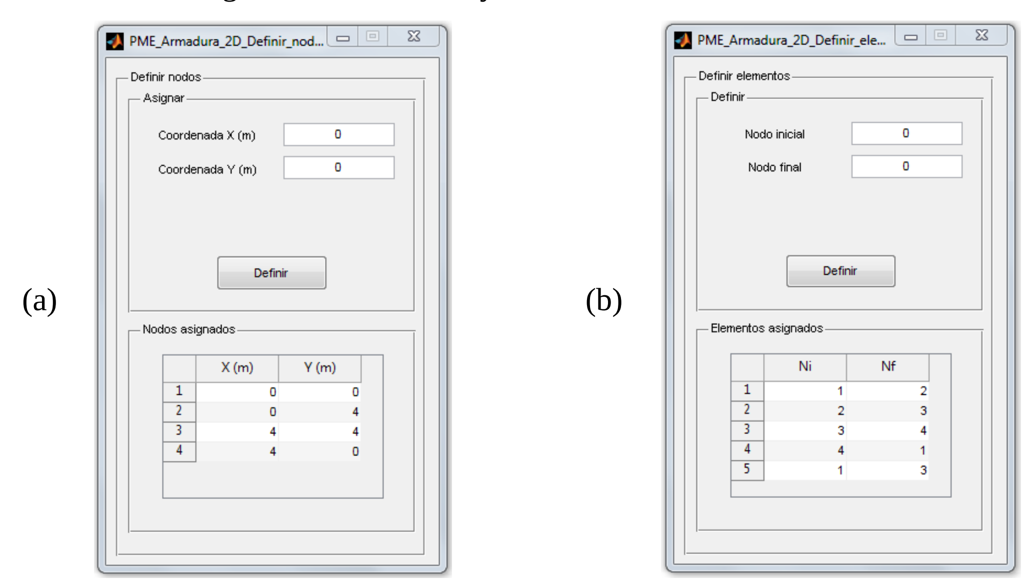


Figura 5.9 Ventanas graficas del ejemplo 2. (a) Definir nodos y (b) Definir elementos.

Una vez introducidos los datos geométricos, se puede visualizar la disposición de los nodos y elementos con sus respectivas etiquetas presionando el botón *Mostrar estructura*, tal y como se muestra en la Figura 5.10.

Propiedades: Para introducir las propiedades del material y de la sección se escoge la opción $Propiedades \rightarrow Asignar\ Seccion/Material$, con ello se despliega en pantalla la ventana de la Figura 5.11. En el recuadro de propiedades se introduce el área, módulo de elasticidad y densidad del elemento, luego se presiona el botón $Asignar$.

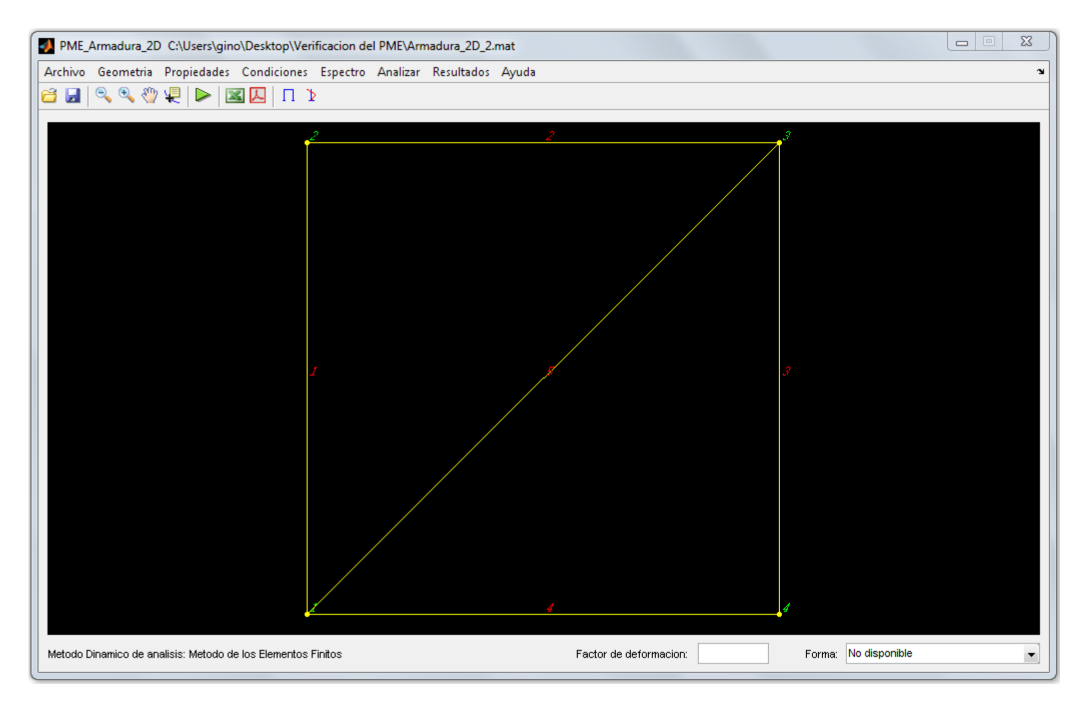


Figura 5.10 Visualización del modelo ejemplo 2.

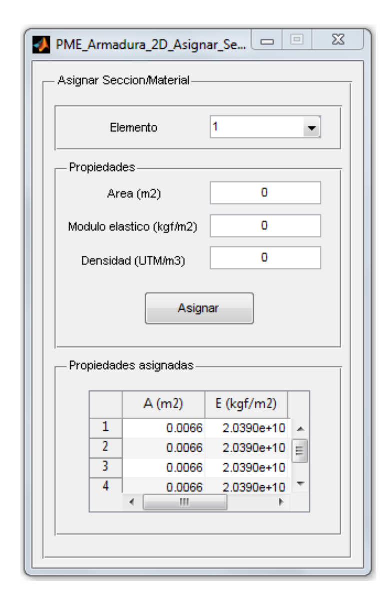


Figura 5.11 Ventana grafica del ejemplo 2. Asignar Sección/Material.

Condiciones: Los apoyos se asignan al modelo seleccionando el nodo al cual se le asignara restricción y eligiendo el *check* según la dirección de la restricción, posteriormente se presiona el botón $Asignar$, ver Figura 5.12.

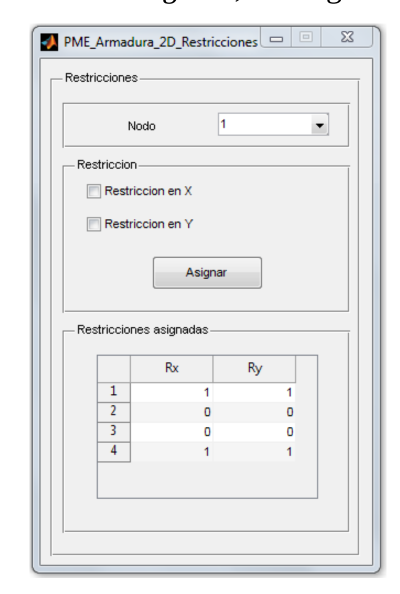


Figura 5.12 Ventana grafica del ejemplo 2. Restricciones.

Análisis: Una vez introducidos todos los datos de entrada, se selecciona la opción $Analizar \rightarrow Analizar\ Armadura\ 2D$, o presionando el botón, con ello se realizan todas las operaciones de cálculo.

Resultados: Los resultados se muestran escogiendo la opción $Resultados$, luego se selecciona $Resultados\ en\ pantalla$. En la Figura 5.13 se muestran los resultados obtenidos para el análisis dinámico modal, donde los periodos están ordenados de mayor a menor para los cuatro modos de vibración de la estructura.

Es importante señalar que el PME realiza el análisis dinámico para las masas provenientes solamente de los elementos, es decir, no se consideran masas adicionales a las de los elementos.

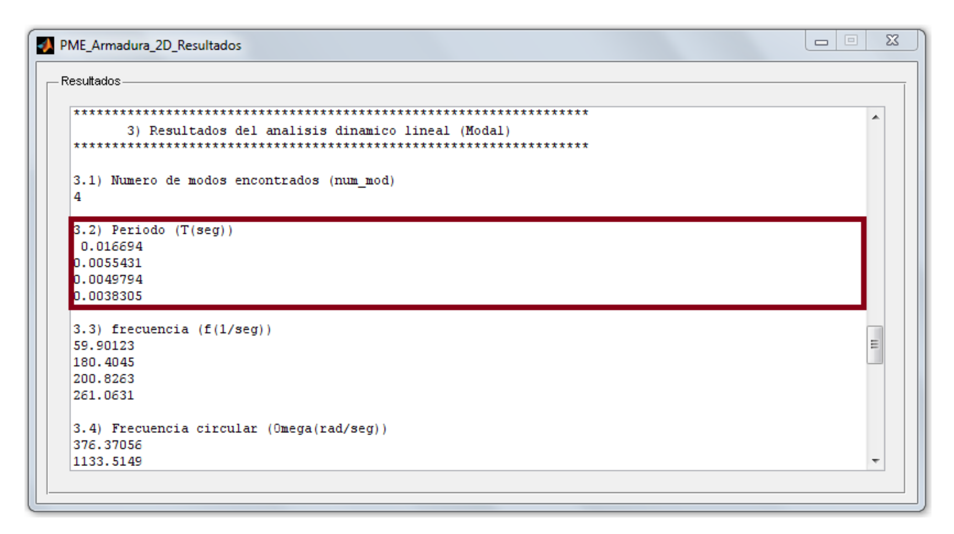


Figura 5.13 Resultados en pantalla del ejemplo 2.

En la Figura 5.14 se presenta la visualización en pantalla del primer modo correspondiente a la armadura. El método de análisis dinámico (Método de los Elementos Finitos o Método de Masas Concentradas) se selecciona presionando el botón, de esta manera se tiene disponible los resultados para el método dinámico seleccionado.

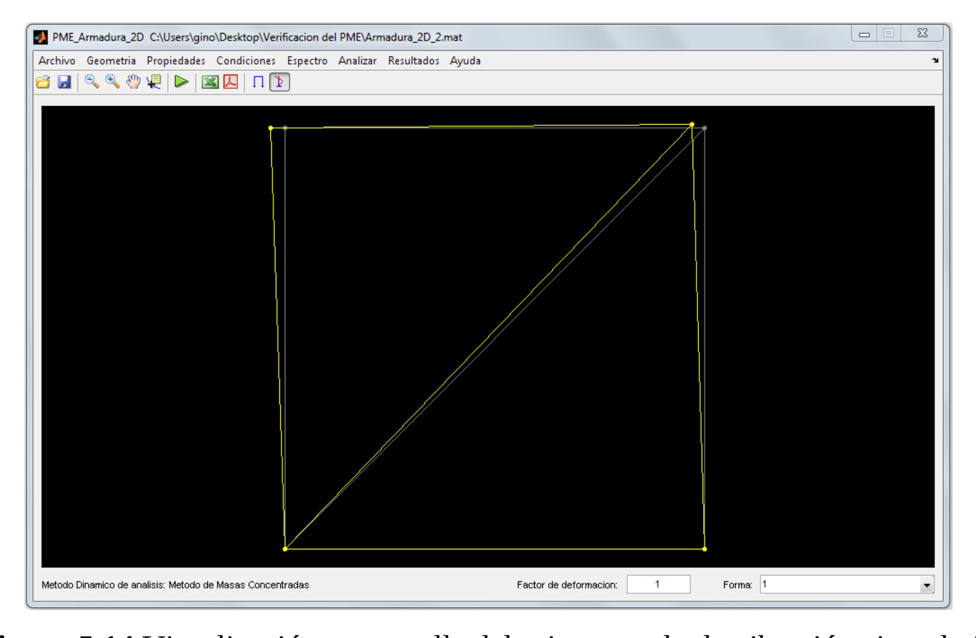


Figura 5.14 Visualización en pantalla del primer modo de vibración ejemplo 2.

Validación de los resultados

Los resultados obtenidos con el PME han sido comparados con los obtenidos en el programa SAP2000. La diferencia en porcentaje se calcula de la siguiente forma:

$$Diferencia\% = 100\% \times \left(\frac{PME\ resultados}{Otros\ resultados} - 1\right)$$

Tabla 5.2 Comparación de resultados para el ejemplo 2.

Parámetro	**PME**	**SAP2000**	**Diferencia %**
T_1	$0.016694\ seg$	$0.01669\ seg$	0.02 %
T_2	$0.0055431\ seg$	$0.00554\ seg$	0.06 %
T_3	$0.0049794\ seg$	$0.00498\ seg$	0.01 %
T_4	$0.0038305\ seg$	$0.00383\ seg$	0.01 %

Los valores obtenidos en el PME difieren en menos del 0.07%, por lo tanto los resultados son aceptables.

EJEMPLO 3

Viga continua-Solución utilizando el Método de los Elementos Finitos y el Método de Masas Concentradas

Descripción general

Utilizando una estructura tipo viga, se busca con este ejemplo verificar el Programa Modular de Estructuras para el análisis dinámico modal, además de comparar el Método de los Elementos Finitos y el Método de Masas Concentradas con la solución exacta, ver Figura 5.15. La solución exacta está dada por:

$$\omega_n = \frac{(n\pi)^2}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \tag{5.2}$$

Donde *n* es el número del modo.

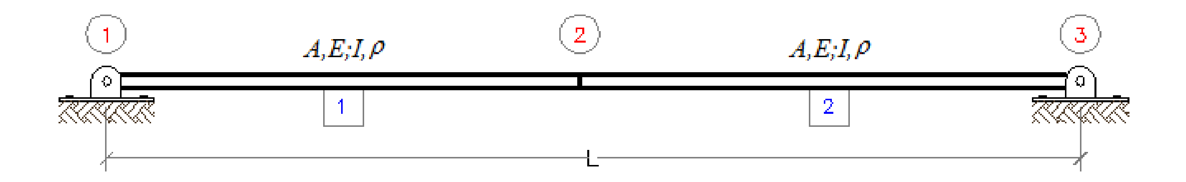


Figura 5.15 Geometría del ejemplo 3.

Para la solución del ejemplo, se considera $EI = 1$, $\rho A = 1$ y $L = 1$

Características del programa evaluadas

- Análisis dinámico modal utilizando el Método de los Elementos Finitos y El Método de Masas Concentradas.

Solución con PME

Geometría: Para asignar las coordenadas de cada nodo, se selecciona $Geometria \rightarrow Definir\ nodos$, después se introduce la coordenada X de cada nodo y se presiona el botón $Definir$. Para establecer los elementos, se escoge la opción $Geometria \rightarrow Definir\ elementos$, seguidamente se asigna el nodo inicial y el nodo final definiendo la conectividad del elemento, posteriormente se presiona el botón $Definir$. La Figura 5.16 muestra las coordenadas asignadas a cada nodo y la conectividad de los elementos en sus respectivas ventanas graficas.

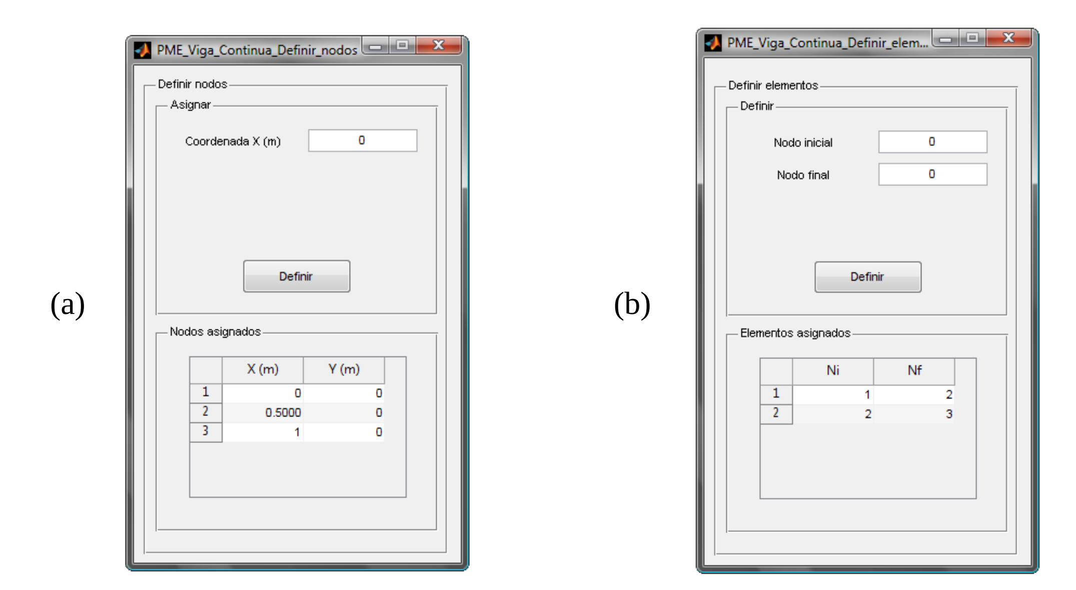


Figura 5.16 Ventanas graficas del ejemplo 3. (a) Definir nodos y (b) Definir elementos.

Una vez introducidos los datos geométricos, se puede visualizar la disposición de los nodos y elementos con sus respectivas etiquetas presionando el botón *Mostrar estructura*, tal y como se muestra en la Figura 5.17.

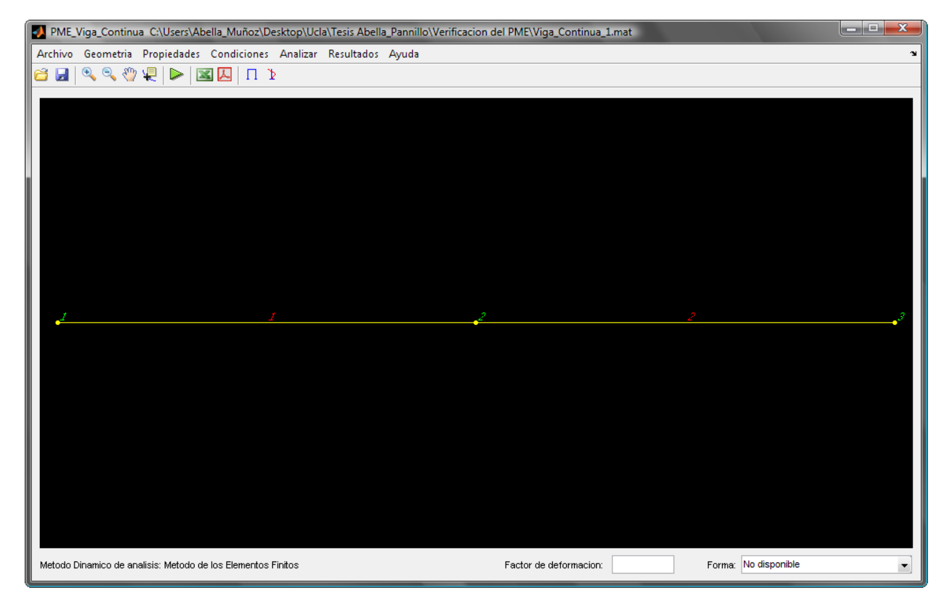


Figura 5.17 Visualización del modelo ejemplo 3.

Propiedades: Para introducir las propiedades del material y de la sección se selecciona la opción $Propiedades \rightarrow Asignar\ Seccion/Material$. En el recuadro de propiedades (ver Figura 5.18) se introduce el área, modulo de elasticidad, inercia y densidad del elemento, luego se presiona el botón $Asignar$.

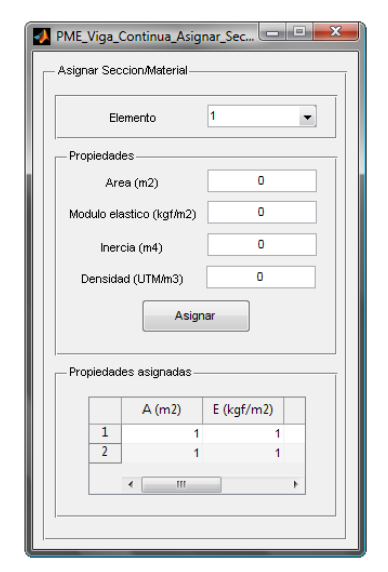


Figura 5.18 Ventana grafica del ejemplo 3. Asignar Sección/Material.

Condiciones: Los apoyos se asignan al modelo presionando el comando $Condiciones \rightarrow Restricciones$, se selecciona el nodo al cual se le asignara la restricción y se marca el *check* según la dirección de la restricción, luego se presiona el botón $Asignar$, ver Figura 5.19.

Análisis: Una vez introducido todos los datos de entrada, se selecciona la opción $Analizar \rightarrow Viga\ Continua$, o presionando el botón , con ello se realizan todas las operaciones de cálculo.

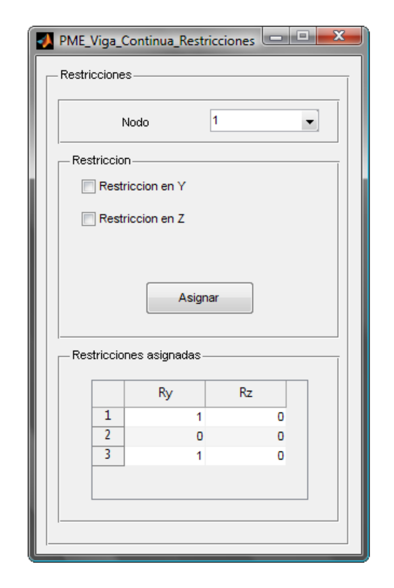


Figura 5.19 Ventana grafica del ejemplo 3. Restricciones.

Resultados: Los resultados se muestran seleccionando la opción *Resultados*, luego se selecciona *Resultados en pantalla*. En la Figura 5.20 se muestra la pantalla de resultados. El método de análisis dinámico (Método de los Elementos Finitos o Método de Masas Concentradas) se selecciona presionando el botón, de esta manera se tiene disponible los resultados para el método dinámico seleccionado.

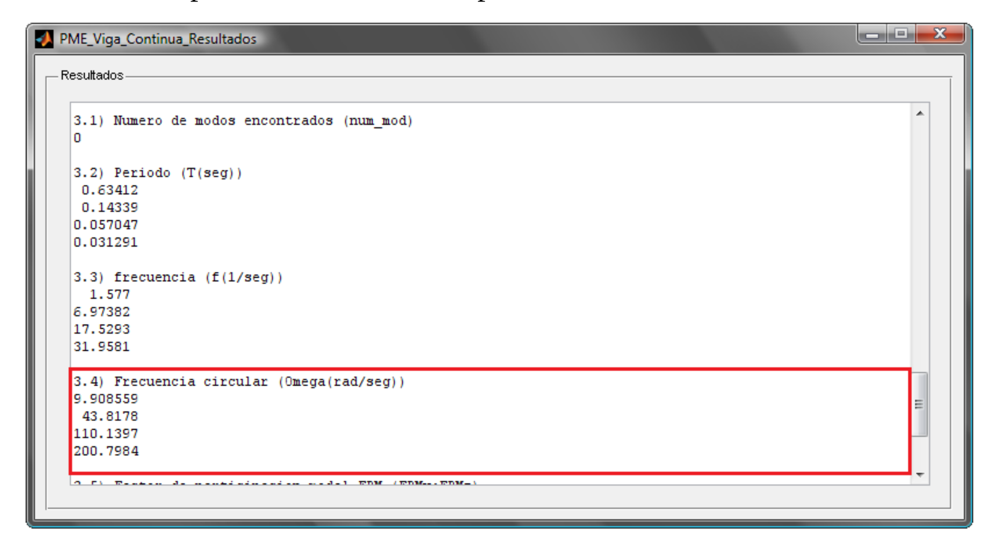


Figura 5.20 Resultados en pantalla del ejemplo 3.

Validación de los resultados

Los resultados obtenidos con el PME han sido comparados con los obtenidos en el texto T.Y Yang. Finite Element Structural Analysis (1986), Ejemplo 7.2 pág. 211. Se utilizo como parámetro de comparación la frecuencia circular ω utilizando el Método de los elementos finitos. La diferencia en porcentaje se calcula de la siguiente forma:

$$Diferencia\% = 100\% \times \left(\frac{PME\ resultados}{Otros\ resultados} - 1\right)$$

Tabla 5.3 Comparación de resultados para el ejemplo 3.

Parámetro	PME	Yang (1986)	Diferencia %
ω_1	$9.908559\ rad/seg$	$9.9085\ rad/seg$	0 %
ω_2	$43.8178\ rad/seg$	$43.82\ rad/seg$	0.01%

Además de los resultados obtenidos para la viga discretizada con 2 elementos, se modeló la viga para una discretización con 3, 4, 5 y 6 elementos.

La tabla 5.4 muestra las frecuencias circulares obtenidas mediante el Método de los Elementos finitos y el Método de Masas Concentradas y la diferencia en porcentaje en comparación con la solución exacta.

La Figura 5.21 muestra la comparación (Método de los Elementos finitos y el Método de Masas Concentradas) con la solución exacta para la frecuencia circular de la viga en el primer modo de vibración utilizando diferentes número de elementos para la discretización.

Tabla 5.4 Comparación de resultados para 2, 3, 4, 5 y 6 elementos ejemplo 3.

Número de elementos	**Modo**	**Solución exacta ω**	**Método Elementos finitos**		**Método Masas Concentradas**	
			ω	**Diferencia %**	**ω**	**Diferencia %**
2	1	9.870	**9.909**	**0.394**	**9.978**	**1.086**
	2	39.478	43.818	9.904	-	-
3	1	9.870	**9.878**	**0.085**	**9.894**	**0.247**
	2	39.478	39.920	1.106	37.719	4.665
	3	88.826	98.602	9.914	-	-
4	1	9.870	**9.872**	**0.024**	**9.867**	**0.026**
	2	39.478	39.634	0.393	39.192	0.731
	3	88.826	90.450	1.795	83.213	6.746
	4	157.914	175.271	9.903	-	-
5	1	9.870	**9.871**	**0.014**	**9.868**	**0.016**
	2	39.478	39.544	0.166	39.381	0.247
	3	88.826	89.532	0.788	87.178	1.891
	4	157.914	161.551	2.252	143.556	10.001
	5	246.740	273.861	9.903	-	-
6	1	9.870	**9.870**	**0.004**	**9.869**	**0.006**
	2	39.478	39.510	0.080	39.409	0.176
	3	88.826	89.177	0.393	88.182	0.731
	4	157.914	159.801	1.181	153.119	3.131
	5	246.740	253.290	2.586	218.532	12.908
	6	355.306	394.362	9.904	-	-

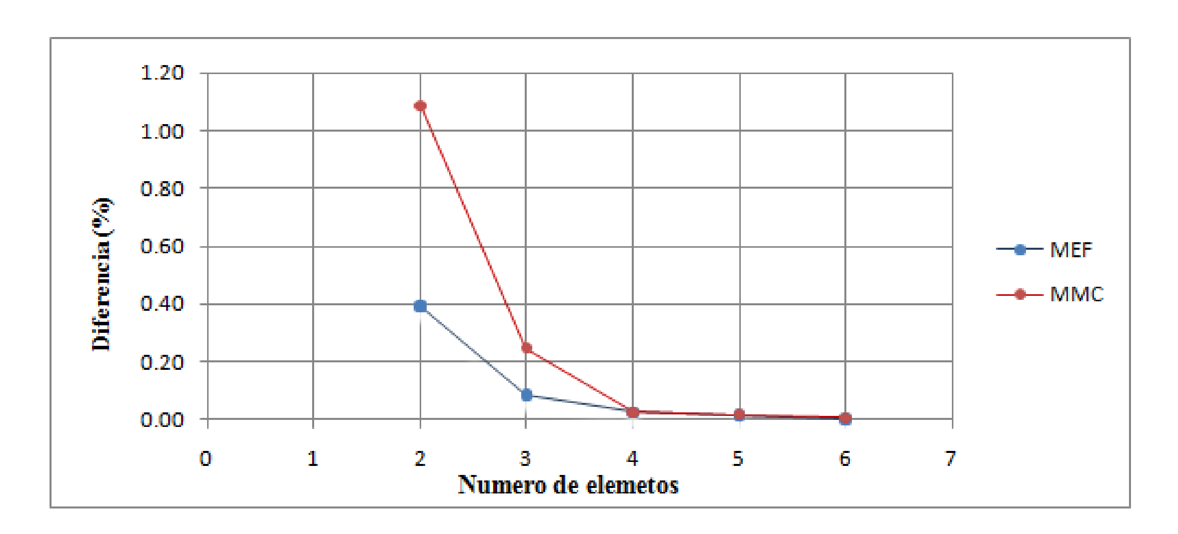


Figura 5.21 Comparación de resultados. Primer modo de vibración.

En la Figura 5.21 se evidencia una diferencia menor para el Método de los Elementos Finitos para un mismo número de elementos, lo que resulta más preciso y eficiente para la solución del problema dinámico con menor número de elementos.

EJEMPLO 4

Pórtico 2D-Fuerzas nodales y fuerzas distribuidas

Descripción general

Utilizando una estructura tipo pórtico, se pretende con este ejemplo verificar el Programa Modular de Estructuras bajo la acción de fuerzas aplicadas en los nodos en dirección del eje global y fuerzas distribuidas aplicadas en dirección del eje local de cada elemento. Para la verificación se determinará el desplazamiento horizontal del nodo *2* y la deflexión a *3m* del apoyo *1* (Elemento *1*). Figura 5.22. Considerar todos los elementos con una sección transversal tipo $W18 \times 35$.

$A = 0.006645\ m^2$

$E = 20390000000 \frac{kgf}{m^2}$

$I = 0.00021227\ m^4$

$\rho = 800.3801\ \frac{UTM}{m^3}$

Características del programa evaluadas

- Solución bajo fuerzas nodales y distribuidas.

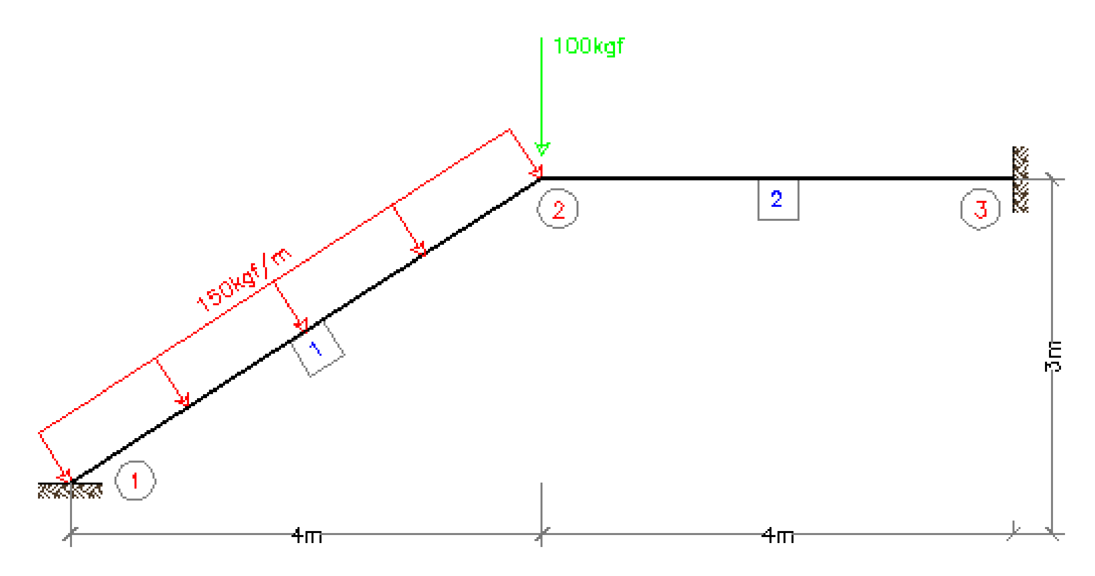


Figura 5.22 Geometría del ejemplo 4.

Solución con PME

Geometría: Para asignar las coordenadas de cada nodo, se escoge la opción $Geometria \rightarrow Definir\ nodos$, seguidamente se introducen la coordenada X y Y de cada nodo y se presiona el botón $Definir$. Para asignar los elementos, se selecciona la opción $Geometria \rightarrow Definir\ elementos$, posteriormente se asigna el nodo inicial y el nodo final definiendo la conectividad del elemento y se presiona el botón $Definir$.

La Figura 5.23 muestra las coordenadas asignadas a cada nodo y la conectividad de los elementos en sus respectivas ventanas graficas.

Una vez introducidos los datos geométricos, se puede visualizar la disposición de los nodos y elementos con sus respectivas etiquetas presionando el botón *Mostrar estructura*, tal y como se muestra en la Figura 5.24.

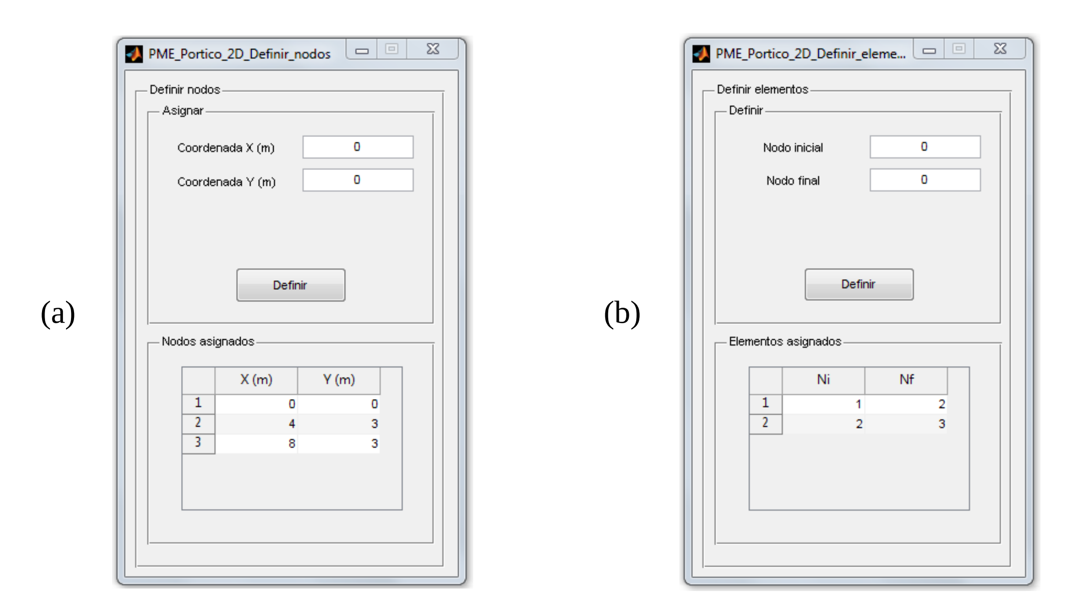


Figura 5.23 Ventanas graficas del ejemplo 4. (a) Definir nodos y (b) Definir elementos.

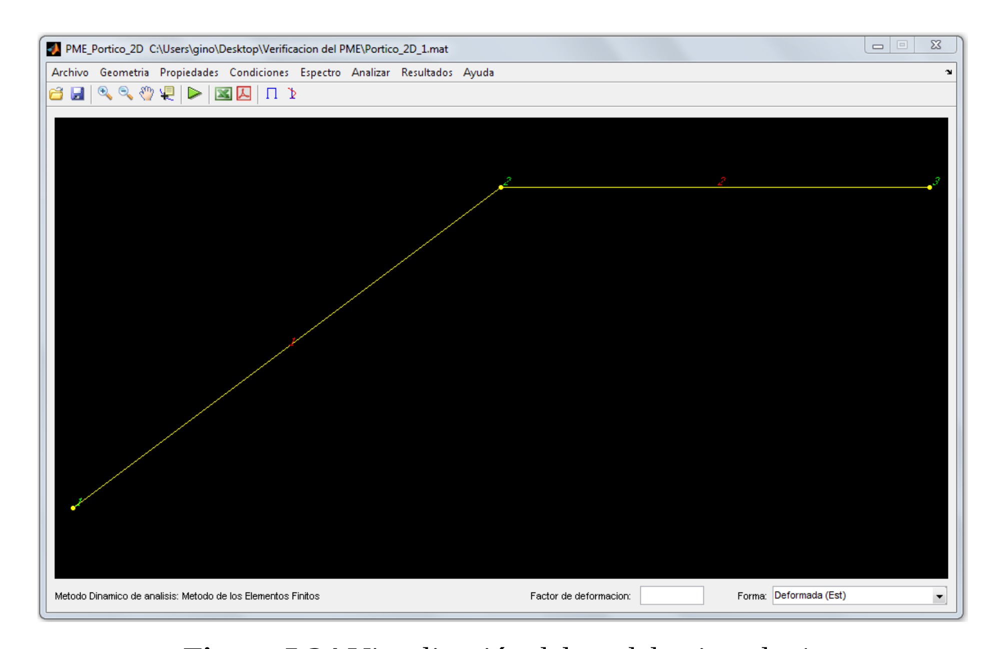


Figura 5.24 Visualización del modelo ejemplo 4.

Propiedades: Para introducir las propiedades del material y de la sección se selecciona la opción $Propiedades \rightarrow Asignar\ Seccion/Material$, con ello se

despliega en pantalla la ventana mostrada en la Figura 5.25. En el recuadro de propiedades se introduce el área, modulo de elasticidad y densidad para cada elemento y luego se presiona el botón *Asignar*.

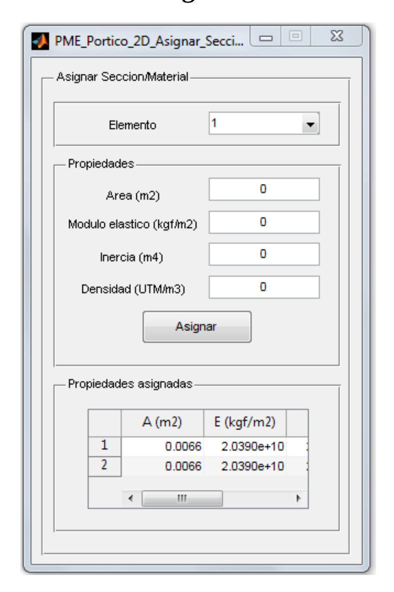
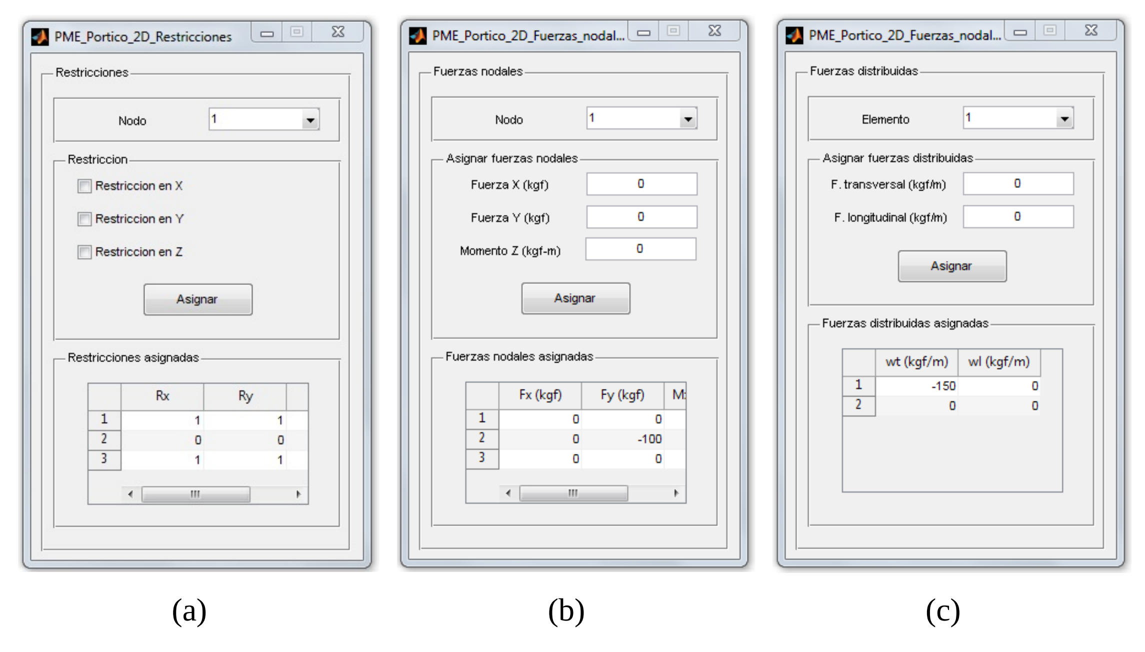


Figura 5.25 Ventana grafica del ejemplo 4. Asignar Sección/Material.

Condiciones: Los apoyos se asignan al modelo eligiendo el nodo al cual se le asignara restricción y seleccionando el *check* según la dirección de la restricción, luego se presiona el botón *Asignar*.

Las fuerzas se asignan en las ventanas *Fuerzas nodales* y *Fuerzas distribuidas*, ver Figura 5.26.

Análisis: Una vez introducido todos los datos de entrada, se selecciona la opción *Analizar* → *Analizar Portico* 2*D*, o presionando el botón, con ello se realizan todas las operaciones de cálculo.



(a) (b) (c)

Figura 5.26 Ventanas graficas del ejemplo 4. (a) Restricciones, (b) fuerzas nodales y (c) fuerzas distribuidas.

Resultados: Los resultados para los desplazamientos se muestran con el comando *Resultados*, seguidamente se elige la opción *Resultados en pantalla*. En la Figura 5.27 se muestra la ventana de resultados.

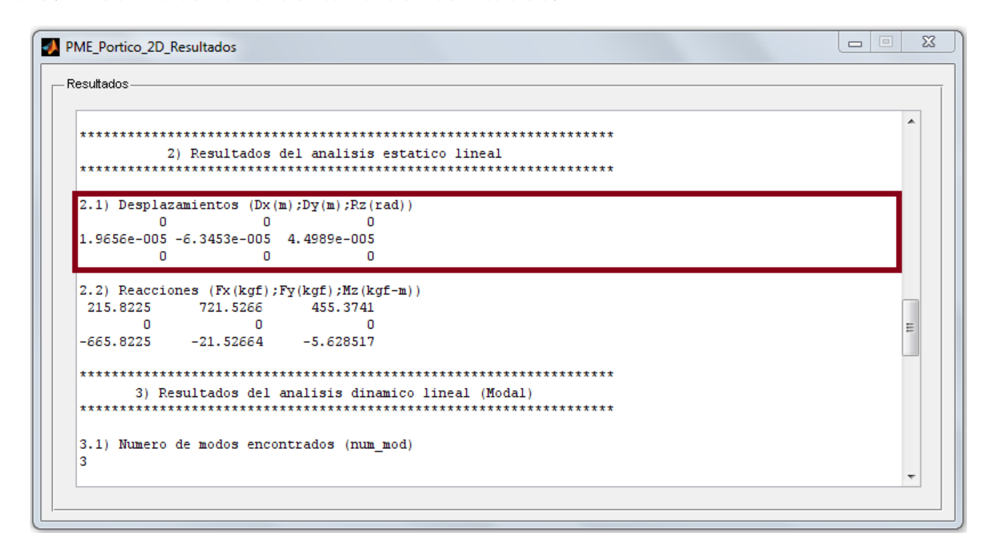


Figura 5.27 Resultados en pantalla del ejemplo 4.

Para visualizar la deflexión del punto localizado a 3m del apoyo *1* se selecciona $Resultados \rightarrow Diagramas$, en donde se escoge la opción $Deformada$ del menú y seleccionando el elemento 1, colocando el *scroll* a 3m del apoyo 1 y tomando lectura del valor de la deformada en ese punto tal y como se muestra en la Figura 5.28.

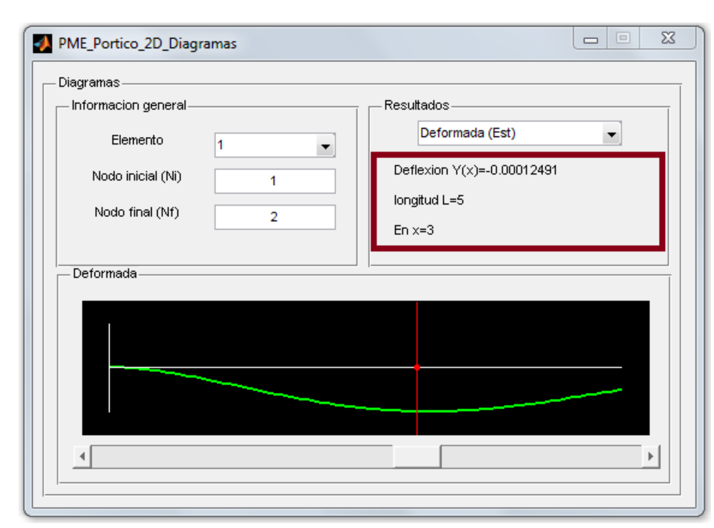


Figura 5.28 Resultados. Diagramas del ejemplo 4.

Validación de los resultados

Los resultados obtenidos con el PME han sido comparados con los obtenidos en el programa SAP2000. La diferencia en porcentaje se calcula de la siguiente forma:

$$Diferencia\% = 100\% \times \left(\frac{PME\ resultados}{Otros\ resultados} - 1\right)$$

Tabla 5.5 Comparación de resultados para el ejemplo 4.

Parámetro	PME	SAP2000	Diferencia %
Dx_2	$1.9656 \times 10^{-5}\ m$	$1.982 \times 10^{-5}\ m$	0.83 %
$y_{(x=3m)}$	$-0.000125\ m$	$-0.000126\ m$	0.79 %

Los valores obtenidos en el PME difieren en menos del 0.9%, por lo tanto los resultados son aceptables.

EJEMPLO 5

Edificio de cortante 2D-Analisis dinámico modal

Descripción general

Utilizando una estructura tipo Edificio de cortante, ver Figura 5.29, se pretende con este ejemplo verificar el Programa Modular de Estructuras para el cálculo de las frecuencias circulares correspondientes.

Considerar $E = 2.1 \times 10^6 \frac{kgf}{cm^2} \rightarrow 2.1 \times 10^{10} \frac{kgf}{m^2}$.

Para cada columna del primer nivel:

$I_1 = 10200\ cm^4 \rightarrow 0.000102\ m^4$

Considerar para cada columna del segundo nivel:

$I_2 = 4400\ cm^4 \rightarrow 0.000044\ m^4$

Las masas asignadas a cada nivel son:

$$m_1 = 29.59 \frac{kgf \times seg^2}{cm} \rightarrow 2959 \frac{kgf \times seg^2}{m}$$

$$m_2 = 14.29 \frac{kgf \times seg^2}{cm} \rightarrow 1429 \frac{kgf \times seg^2}{m}$$

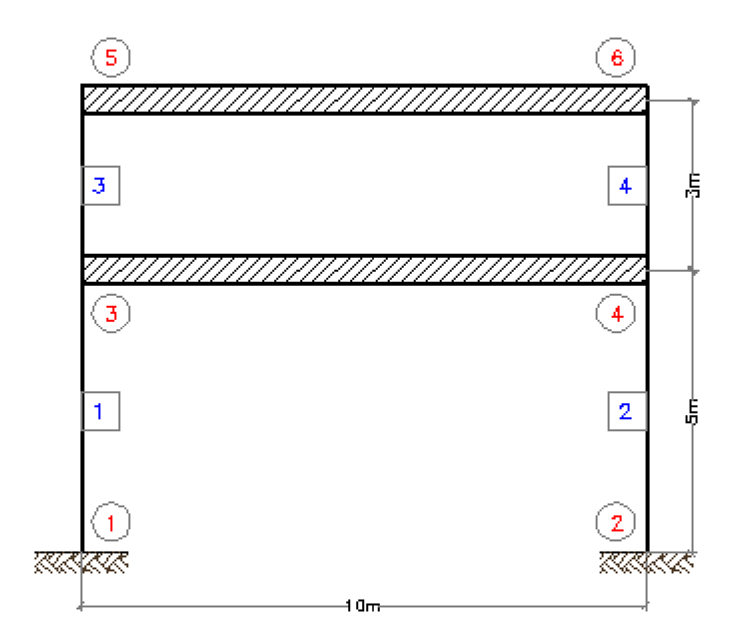


Figura 5.29 Geometría del ejemplo 5.

Características del programa evaluadas

- Análisis dinámico modal para el modulo Edificio de corte 2D.

Solución con PME

Geometría: Para asignar las coordenadas de cada nodo, se selecciona $Geometria \rightarrow Numero\ de\ pisos\ \ /\ Numero\ de\ tramos$, seguidamente se introduce la cantidad de pisos y de tramos de la estructura. Las dimensiones de cada entrepiso se asignan a través del comando $Geometria \rightarrow Alturas\ de\ entrepiso$ y en donde se coloca el valor respectivo de cada nivel. Para las dimensiones de cada tramo de la estructura se selecciona la opción $Geometria \rightarrow Longitud\ de\ los\ tramos$, al incorporar el valor respectivo de cada tramo, ver Figura 5.30.

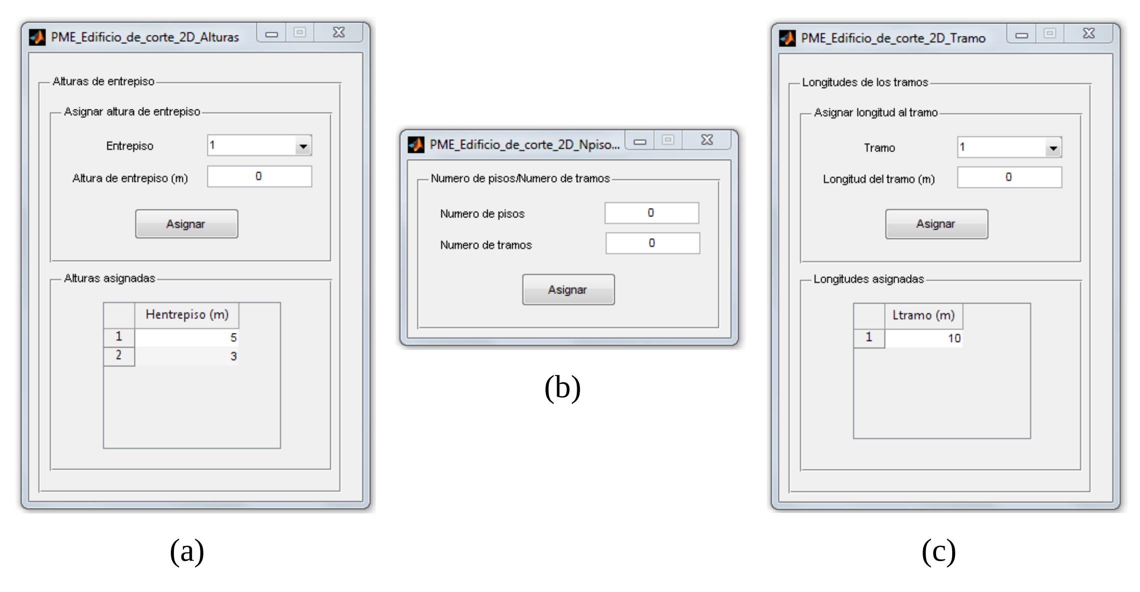


Figura 5.30 Ventanas graficas del ejemplo 5. (a) Alturas de entrepiso, (b) Número de pisos/Número de tramos y (c) Longitud de los tramos.

Una vez introducidos los datos geométricos, se puede visualizar la disposición de los nodos y elementos con sus respectivas etiquetas presionando el botón *Mostrar estructura*, tal y como se muestra en la Figura 5.31.

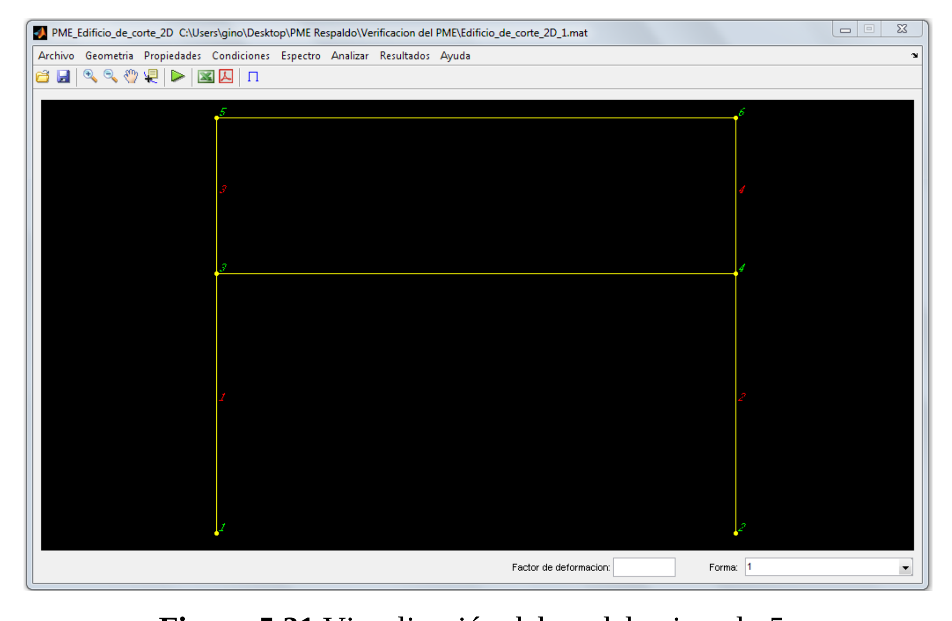


Figura 5.31 Visualización del modelo ejemplo 5.

Propiedades: Para introducir las propiedades del material y de la sección se selecciona la opción $Propiedades \rightarrow Asignar\ Seccion/Material$. En el recuadro de propiedades se introduce modulo de elasticidad y la inercia del elemento, luego se presiona el botón $Asignar$, ver Figura 5.32.

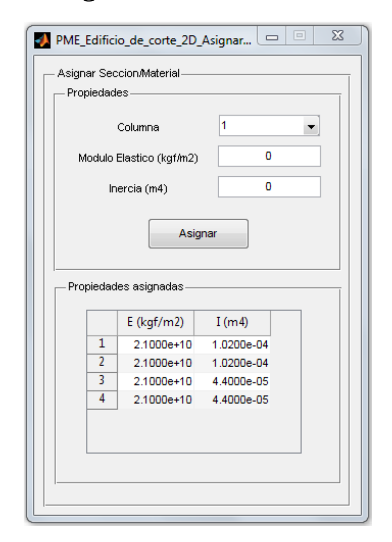


Figura 5.32 Ventana grafica del ejemplo 5. Asignar Sección/Material.

Condiciones: Los masas se asignan al modelo mediante el comando $Condiciones \rightarrow Masas$, seleccionando el nivel al cual se le asignara la masa y presionando el botón $Asignar$, ver Figura 5.33.

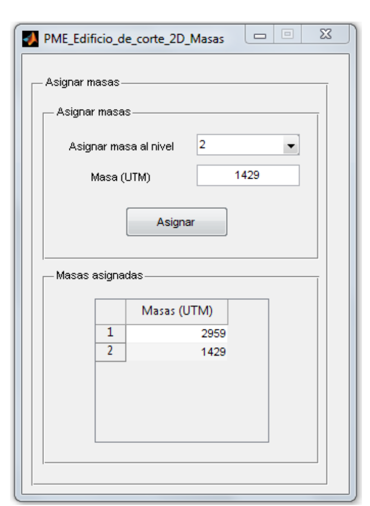


Figura 5.33 Ventana grafica del ejemplo 5. Masas por nivel.

Análisis: Una vez introducido todos los datos de entrada, se selecciona la opción $Analizar \rightarrow Analizar\ Edificio\ de\ corte\ 2D$, o presionando el botón, con ello se realizan todas las operaciones de cálculo.

Resultados: Los resultados se muestran con la opción $Resultados$, posteriormente se selecciona $Resultados\ en\ pantalla$. En la Figura 5.34 se muestra la ventana de resultados.

```
PME_Edificio_de_corte_2D_Resultados
Resultados
2959      0
   0   1429

*******************************************************************
       2) Resultados del analisis dinamico lineal (Modal)
*******************************************************************

2.1) Numero de modos encontrados (num_mod)
2

2.2) Periodo (T(seg))
0.66796
0.20911

2.3) frecuencia (f(1/seg))
1.4971
4.7822

2.4) Frecuencia circular (Omega(rad/seg))
9.40647
30.0473
```

Figura 5.34 Resultados en pantalla del ejemplo 5.

Validación de los resultados

Los resultados obtenidos con el PME han sido comparados con los obtenidos en el texto Paz Mario. Dinámica Estructural (1992), Ejemplo 11-1 pág. 234. La diferencia en porcentaje se calcula de la siguiente forma:

$$Diferencia\% = 100\% \times \left(\frac{PME\ resultados}{Otros\ resultados} - 1 \right)$$

Tabla 5.6 Comparación de resultados para el ejemplo 5.

Parámetro	PME	Paz (1992)	Diferencia %
ω_1	9.40647	9.41	0.04 %
ω_2	30.0473	30.05	0.01 %

Los resultados obtenidos en el PME difieren en menos del 0.05%, por lo tanto los resultados son aceptables.

6. BASES TEORICAS

6.1 SISTEMA DE COORDENADAS GLOBAL

El sistema de coordenadas global o de la estructura, es un sistema de dos dimensiones, que satisface la regla de la mano derecha, denotados como *X*-*Y* los cuales son perpendiculares entre si y poseen una ubicación arbitraria sobre la estructura. Las coordenadas de cada nodo del modelo están referenciadas a este sistema de coordenadas. Estas son ingresadas, modificadas y eliminados por medio de las ventanas graficas *Definir nodos*, *Modificar nodos* y *Eliminar nodos* respectivamente.

6.2 SISTEMA DE COORDENADAS LOCAL

Cada elemento del modelo posee su sistema coordenado conocido como sistema de coordenadas local y definen la orientación del elemento en el plano. Este sistema está formado por los ejes *x*-*y* perpendiculares entre si y siguen la regla de la mano derecha. Cada sistema se crea al definir la conectividad de cada elemento, con origen en el nodo inicial *Ni* y eje *x* a lo largo del eje de cada elemento. Cada elemento es creado, modificado y eliminado del modelo por medio de las ventanas *Definir*

elementos, *Modificar elementos* y *Eliminar elementos* respectivamente.

6.3 PROPIEDADES: ÁREA, MODULO DE ELASTICIDAD, INERCIA Y DENSIDAD

Las propiedades mecánicas y geométricas de cada elemento, son definidas de manera individual para cada uno de ellos, a través de la interfaz gráfica *Definir Sección/Material*. Estas propiedades se utilizan para calcular la rigidez axial, la rigidez a flexión y la masa de cada elemento.

$$Rigidez\ axial = AE$$
$$Rigidez\ a\ flexion = EI$$
$$\overline{m} = \rho AL$$

6.4 NODOS

Los nodos definidos en el modelo desempeñan las siguientes funciones:

- Todos los elementos de la estructura están conectados a otros elementos a través de nodos
- Las restricciones son asignadas a los nodos
- Las cargas puntuales se aplican de manera directa sobre los nodos
- Las masas debido al peso propio de los elementos son concentradas en los nodos (el Programa Modular de Estructuras no considera la masa debido a las cargas aplicadas)

6.5 GRADOS DE LIBERTAD

Los grados de libertad están definidos como el número de coordenadas independientes suficientes para conocer el comportamiento de la estructura. De manera general el Programa Modular de Estructuras considera los siguientes grados de libertad:

- Para armaduras dos grados de libertad traslacionales en dirección de los ejes *X* y *Y*
- Para vigas dos grados de libertad, uno traslacional en dirección del eje *Y* y una rotación respecto a un eje normal al plano *XY*
- Para Porticos tres grados de libertad, dos traslacionales en dirección del eje *X* y *Y*, y una rotación respecto a un eje normal al plano *XY*

Estos tres desplazamientos son conocidos como Grados de libertad de los nodos. Las componentes de los desplazamientos de los nodos son paralelas a los ejes del sistema de coordenadas global.

6.6 RESTRICCIONES

Por defecto, cuando se crea un nodo, se habilitan todos los grados de libertad del nodo; sin embargo, es posible restringir los grados de libertad. La ventana gráfica *Restricciones* permite restringir los desplazamientos en la dirección deseada asignando al programa un valor de 0 para los grados de libertad libres y 1 para los grados de libertad restringidos.

6.7 DESPLAZAMIENTOS IMPUESTOS

Para asignar un desplazamiento predeterminado a un nodo en dirección de

cualquiera de sus grados de libertad, se debe primeramente restringir el nodo. Los nodos restringidos por defecto poseen un valor de desplazamiento igual a 0, o un valor predeterminado asignado por el usuario por medio de la ventana grafica *Desplazamientos impuestos*. Los grados de libertad libres no poseen un valor predeterminado de desplazamiento, sino que el programa calcula su valor, mientras que los grados de libertad restringidos poseen un valor de desplazamiento conocido, lo cual permite ordenar el vector de desplazamientos para la solución matricial del sistema utilizando el método de rigidez directa.

$$\begin{Bmatrix} Fl \\ Fr \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Kll & Klr \\ Krl & Krr \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Dl \\ Dr \end{Bmatrix}$$

6.8 FUERZAS NODALES Y FUERZAS DISTRIBUIDAS

Las fuerzas nodales son fuerzas puntuales externas aplicadas directamente sobre los nodos, y tienen la dirección de los ejes globales de la estructura. Las fuerzas distribuidas son fuerzas distribuidas a lo largo del elemento de valor uniforme y tienen la dirección de los ejes locales.

El vector de fuerzas se ensambla considerando las fuerzas nodales y las fuerzas nodales equivalentes a las fuerzas distribuidas uniformes, obtenidas como reacciones de las fuerzas sobre los elementos en dirección de los ejes globales.

6.9 MASAS

El Programa Modular de Estructuras ofrece al usuario la posibilidad de escoger la matriz de masas a utilizar en el análisis.

- Matriz diagonal de masas o matriz de masas concentradas: Este método

considera que la mitad de la masa de cada elemento es repartida a los extremos (nodos), para los grados de libertad traslacionales.

- Matriz de masas consistente (Método de los Elementos Finitos MEF): Este método utiliza las funciones de forma para la deducción de la matriz de masas.

La matriz de masas utilizada se ensambla considerando solo las masas aportadas por los elementos, no se toma en consideración la masa aportada proveniente de las fuerzas aplicadas.

6.10 ANÁLISIS ESTÁTICO LINEAL

El análisis estático lineal involucra resolver el siguiente sistema

$$F = KD$$

$$\begin{Bmatrix} Fl \\ Fr \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Kll & Klr \\ Krl & Krr \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Dl \\ Dr \end{Bmatrix}$$

Donde K es la matriz de rigidez de la estructura, F es el vector de cargas aplicadas y D el vector de desplazamientos. Los subíndices l y r denotan grados de libertad libres y grados de libertad restringidos respectivamente.

6.11 ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL (ANALISIS MODAL)

El análisis modal utilizado para vibración libre no amortiguada de la estructura se realiza resolviendo la ecuación

$$[K - \Omega^2 M]\Phi = 0$$

Donde K es la matriz de rigidez de la estructura, M la matriz de masas, Ω^2 es la matriz diagonal de autovalores y Φ la matriz de autovectores (forma modal).

Cada pareja autovalor-autovector es conocida como modo de vibración natural de la estructura. La frecuencia circular ω, la frecuencia f y el periodo T quedan definidos como

$$\omega = \sqrt{\Omega^2} \qquad f = \frac{\omega}{2\pi} \qquad T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$$

6.12 ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL (ANALISIS MODAL ESPECTRAL)

El análisis modal espectral es utilizado para determinar la respuesta de una estructura a cargas sísmicas.

Espectro de diseño

El Programa Modular de Estructuras utiliza como espectro de diseño el espectro propuesto en la Norma Venezolana *COVENIN 1756:2001*, la cual es una curva de Periodos vs Aceleraciones. Esta curva es utilizada para extraer las aceleraciones de diseño para cada periodo de la estructura. Las aceleraciones obtenidas son aplicadas solo a los grados de libertad en dirección del eje global *X*, es decir, grados de libertad horizontales.

Factor de Participación modal FPM

Los Factores de Participación Modal están definidos como el producto punto de la forma modal del modo *n* y la masa. Los factores de participación para cada dirección resultan

$$\Gamma_{xn} = {\phi_{xn}}^T \cdot m_x$$

$$\Gamma_{yn} = {\phi_{yn}}^{T} \cdot m_y$$
$$\Gamma_{zn} = {\phi_{zn}}^{T} \cdot m_z$$

Combinación Modal

La combinación modal se utiliza para conseguir la respuesta total, debido a la respuesta obtenida para cada modo de vibración.

Método SRSS: El método SRSS (Square Root of the Sum of Squares) estima la respuesta en función de los valores máximos, donde *N* es el número de modos.

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} {R_i}^2}$$

Método CQC: El método CQC (Complete Quadratic Combination) es un método que toma en cuenta el acoplamiento estático entre modos cercanos basados en la teoría de vibración aleatoria. La respuesta se estima como:

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} R_i \rho_{ij} R_j}$$

Donde *N* es el número de modos, en el cual los coeficientes modales pueden aproximarse por:

$$\rho_{ij} = \frac{8\xi^2(1+r)r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4\xi^2 r(1+r)^2}$$

Donde ξ es la razón de amortiguamiento, y $r = \omega_j/\omega_i$ a razón de frecuencias circulares entre los modos *i* y *j*.